第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

基于模糊数学的甘肃河东地区短时暴雨的大气环境参数综合评价研究

赵玉娟， 路亚奇， 张洪芬， 张可心， 周忠文， 刘 英
（庆阳市气象局，甘肃 庆阳 745000）

摘 要： 为了改进短时暴雨预报方程，提高短时暴雨预报准确率，综合评价多种大气环境参数对甘肃河东短时暴雨预报的影响权重是十分必要的。本文利用甘肃河东2013—2018年汛期降水量资料，采用百分位法计算了甘肃河东6—8月短时暴雨阈值，根据阈值挑选出甘肃河东92个短时暴雨个例，使用ECMWF 0.25°×0.25°再分析资料，分析大气环境参数发现，K指数、700 hPa相对湿度、大气可降水量等参数对甘肃河东短时暴雨有较好的指示意义；基于模糊数学的方法，考虑显著性及适度性，构建了28个大气环境参数的综合评价方案，得出不同时段大气环境参数权重，综合分析表明：甘肃河东汛期发生短时暴雨时，各时段大气环境参数权重排序不同，预报短时暴雨时需考虑其所处气候时段大气环境参数的权重，并对权重排序较前的参数进行重点考虑。

关键词： 甘肃河东；短时暴雨；模糊数学；大气环境参数；ECMWF细网格模式

短时暴雨是夏季常见的一种灾害性天气[1]，具有历时短、强度大、落区分散、危害严重等特点，易引发城市洪涝、山体滑坡、泥石流等次生衍生灾害[2-3]。甘肃河东受西风带天气系统、高原天气系统及东亚夏季风系统共同影响，是气候变化的敏感区[4]，且地形复杂、土质疏松、海拔落差大，山体滑坡、泥石流和土壤侵蚀等次生地质灾害频发。近年来，多次出现由短时暴雨引发的洪涝灾害，造成了较大的经济损失甚至人员伤亡，研究表明甘肃省由暴洪造成的经济损失呈增加趋势[5]。如："2013年7月13—14日"庆阳市环县樊家川短时暴雨造成突发山洪，致使2人死亡，6人失踪，1人受伤；"2018年7月18—23日"临夏州东乡县多次出现短时暴雨，造成13人死亡，3人失踪，45人受伤。可见，短时暴雨在甘肃河东致灾性特别强，因而受到学者们普遍关注。

关于短时暴雨的研究大多基于实况、雷达、云图资料进行分析，如张丹梅等[6-7]分析了阜新地区及陕西秦岭北麓短时暴雨特征；邓秋华等[8]按照暴雨云团的不同触发条件，建立了5种云团概念模型；郭林等[9]以天气影响系统为分类标准，将短时暴雨分为3大类型；陈秋萍等[10]以天气类型为基础，建立了闵中北短时暴雨概念模型；孙莹等[3]结合雷达回波特征建立了桂林短时暴雨的概念模型；还有学者结合中尺度雷达回波形态，提出了短时暴雨临近预报着眼点[11-12]。

近年来，数值天气预报发展迅速，对日常预报有较大的指导作用，但应用中发现其对降水预报存在一定的误差，如张君霞等[13]研究发现，ECMWF及GRAPES-GFS模式对青藏高原东北侧暴雨落区位置预报均较实况偏西偏北等，为了减少预报误差，一些气象工作者采用统计方法对模式的定量降水预报进行了订正，其对中雨以下量级的降水有一定的改善，但对强降水预报的订正不理想[14-19]。随着多源资料的广泛应用，一些学者通过个例分析，获得对当地短时暴雨预报有指导意义的参数特征及参数阈值[20-22]，但均是针对雷达、云图、动力某一方面的参数进行研究，并没有对多种参数进行综合评价，且研究中发现不同地区、不同季节短时暴雨对

收稿日期： 2022-05-29； **修订日期：** 2022-12-11
基金项目： 甘肃省气象局气象科研项目(MS2022-09-B)；甘肃省气象局气象科技项目(人才专项)(2122rczx-青年优秀科技人才-04)；甘肃省自然科学基金(22JR5RM1045)；甘肃省气象局气象科技项目(人才专项)(2122rczx-英才计划-04)
作者简介： 赵玉娟(1986-)，女，工程师，硕士研究生，主要从事中短期预报及灾害性天气气候研究. E-mail: yyhapply_92888@126.com
通讯作者： 路亚奇. E-mail: 546088225@qq.com

大气环境参数的敏感度不同,每种参数所起的作用也不同,可见单一的参数阈值不能表征强对流天气发生的环境条件[23]。因此,综合评价多种环境参数在强对流天气预报中得到应用。Kuk等[24-25]采用模糊逻辑法建立了韩国、台湾的雷电预报技术;马清云等[26]应用模糊综合评价法得出台风影响的灾情分级及评价系数;陈新建等[27]在地质灾害风险评价中采用了模糊偏差矩阵法并取得了很好的效果。

本文基于模糊数学理论,利用显著性和适度性指标评价方案,针对数值天气预报对甘肃河东短时暴雨预报存在的误差问题,采用EC细网格再分析资料和历史短时暴雨个例,优选多种参数,确定不同时段短时暴雨的大气环境参数权重及预报方程,为短时暴雨预报提供科学参考。

1 研究区概况与资料来源

1.1 研究区概况

甘肃河东占地面积1.78×10^5 km,处于32.52°~37.70° N、100.73°~108.73°E之间,主要包括兰州、定西、白银、甘南、临夏、陇南、天水、平凉、庆阳9个市州,位于青藏高原、内蒙古高原、黄土高原的交汇地带[28],是我国西北干旱区、东部季风区与青藏高原高寒区的交界地带,自西南向东北海拔高度逐渐降低[29],地形复杂、土质疏松、海拔落差大、生态环境脆弱,强降水天气多发,滑坡、泥石流和土壤侵蚀等次生地质灾害频发[30]。

1.2 资料来源

本文所用降水资料选自甘肃河东2272个国家、区域自动气象站,2013—2018年6—8月小时降水量资料;大气环境参数采用同时段ECMWF再分析资料,时间间隔3 h,空间分辨率为0.25°×0.25°,范围为32.25°~37.75°N,100°~109°E。

2 短时暴雨

2.1 短时暴雨标准

短时暴雨尚无统一标准,有学者采用"暴雨橙色、红色预警信号"标准定义短时暴雨和短时大暴雨[31],也有学者将3 h滑动累计雨量≥50 mm定义为短时暴雨[32],由于甘肃河东各月地面植被覆盖率不同,不同降水强度对地面径流的影响也不相同,故而各月的标准也应不同,本文根据翟盘茂等[33]对极端短时强降水的定义,经过研究致灾性及地表径流形成条件,并参考大量历史个例,逐月小时降水量从小到大排序,将99%分位处的降水量定义为该月的短时暴雨标准,经计算甘肃河东短时暴雨标准为:6月降水量16.6 mm·h^{-1}、7月19.1 mm·h^{-1}、8月23.1 mm·h^{-1}。

2.2 短时暴雨个例选取

利用甘肃河东2013—2018年6—8月逐小时降水量资料,按照上段得出的短时暴雨标准,挑选出短时暴雨5857站次,选择≥5站次的过程作为研究对象,经过筛选有92个短时暴雨过程,共3076站次。

2.3 短时暴雨空间分布特征

分析2013—2018年6—8月短时暴雨发生频次(图1)看出,短时暴雨发生频次分布不均,整体看东部及南部偏多,北部偏少。其频次大值区出现在迭部舟曲交界处的岷山山区,达50站次,其次是陇南东南部与陕西汉中盆地接壤地区,为32站次,平凉、庆阳及甘南州在5~11站次之间,其余市州发生频次较少。

2.4 短时暴雨时间分布特征

甘肃河东短时暴雨旬频次分布(图2)显示,其整体趋势呈"单峰"型,6月上旬频次逐渐增加,7月下旬达到最多,8月中旬开始逐渐减小。其中7月下旬至8月上旬发生频次最多,为频发期,这与西北地区东部"七下八上"的强降水频发期基本一致,由于西北地区东部夏季雨带推进与副热带高压脊线北跳及南撤相关,文中根据气候规律,以副热带高压脊线越过30°N为依据,将甘肃河东短时暴雨分为副高北抬期(6月上旬至7月中旬)、滞留期(7月下旬至8月上旬)、南撤期(8月中旬至下旬)3个时段,以下分析按此气候时段研究,简称"北抬期"、"滞留期"、"南撤期"。

3 大气环境参数特征分析

3.1 大气环境参数气候平均值特征

表征强对流天气的大气环境参数种类多,其代表的物理意义各不相同,且单一的参数不能完全表征短时暴雨发生的可能。因此,本文从51个大气环境参数中优选出指示意义较好的热力、动力、不稳定、水汽等参数。根据ECMWF再分析资料,计算得出2013—2018年汛期各参数的格点值,并对其进行

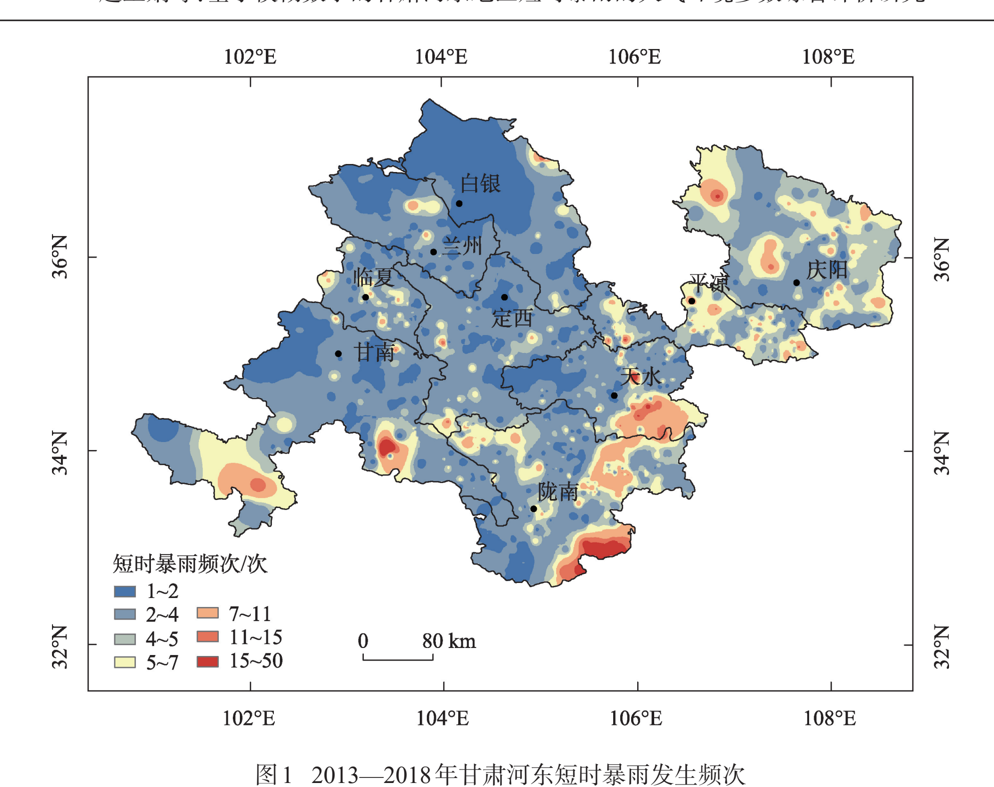




图1 2013—2018年甘肃河东短时暴雨发生频次

Fig. 1 Frequency of short-duration rainstorm in Hedong of Gansu Province from 2013 to 2018

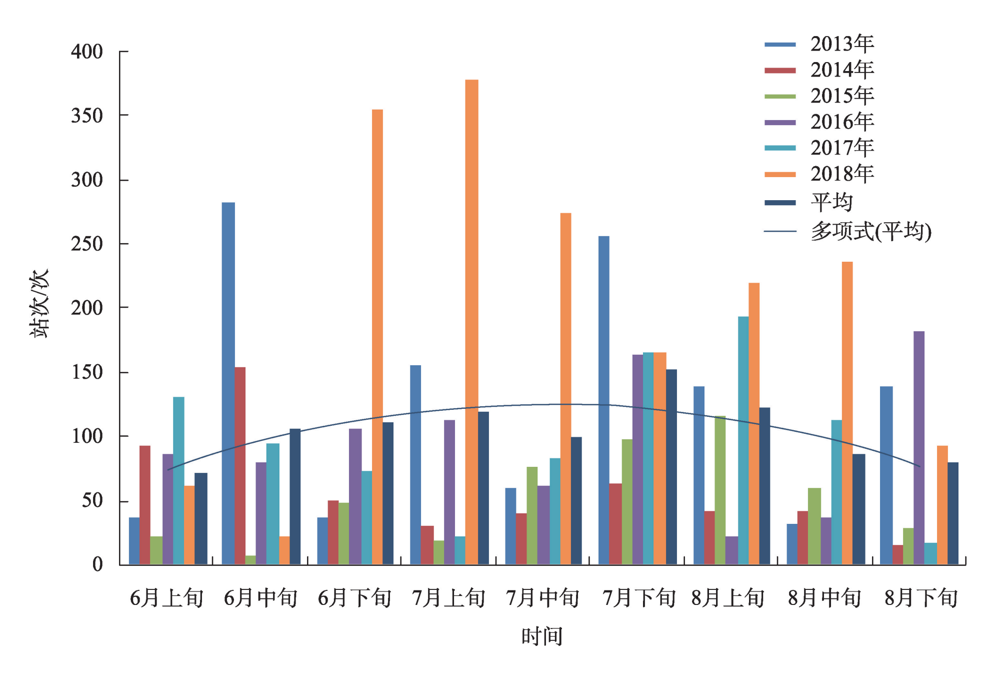


图2 甘肃河东短时暴雨逐旬分布

Fig. 2 Distribution of short-term rainstorm in Hedong of Gansu Province by ten days

逐时段和区域平均，得出甘肃河东参数的气候平均值(表1)，分析发现强天气指数及深对流指数滞留期最大，总指数和500 hPa与850 hPa垂直风切变北抬期最大，这是因为副热带高压北抬时与北方冷空气频繁交汇，层结不稳定，对流活跃所致，其余参数气候平均值均在南撤期最大，这与该地区南撤期受偏南暖湿气流控制，高能、高湿的环境条件有关。

3.2 短时暴雨发生临近时刻大气环境参数特征

采用双线性插值法，选择各站点经纬度临近≤0.25°的格点，作为该站点的格点值，将站点值插值到格点上，挑选出各站点短时暴雨临近时刻≤0.25°的格点参数值，对该值进行逐时段及区域平均，得

出甘肃河东短时暴雨临近时刻参数平均值(表2),分析表明,短时暴雨临近时刻,北抬期、南撤期500 hPa与850 hPa垂直风切变及抬升指数比气候平均值小,对该地区短时暴雨表征不明显,K指数、700 hPa相对湿度、大气可降水量等值明显大于气候平均值,对该地区短时暴雨有较好的指示意义。

4 基于模糊数学的大气环境参数综合评价方案的建立

4.1 评价方案选取

表征强对流天气的大气环境参数种类多,其代表的物理意义各不相同,加之甘肃河东地形地貌复杂,海拔落差大,因此单一的参数难以表征短时暴雨的特征,本文初步选取51个参数,通过数据优选,去除短时暴雨发生时特征不明显的参数,再从意义相近的参数中优选出一种来研究,最终筛选出28个参数作为待评价方案(表3)。即:

$$X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\} \quad (1)$$

式中:n为待选大气环境参数,n=28。

4.2 评价指标选取

在不同的地表特征及气候背景下,大气环境参数对短时暴雨的作用不同,要想从28个参数中选出对甘肃河东短时暴雨有关键指示作用的参数,需考虑反映环境大气异常的显著性及短时暴雨发生时参数自身变化的适度性为评价指标。

(1) 显著性:短时暴雨发生临近时刻大气环境参数值与对应时段气候平均值的差值。

(2) 适度性:短时暴雨发生临近时刻大气环境参数值与短时暴雨发生时平均值的差值。评价指标如下:

$$Y=\{y_1,y_m\},\quad m=2 \quad (2)$$

4.3 大气环境参数矩阵的建立

将X中的方案用Y中的指标来衡量,得到一个参数值矩阵,即所有大气环境参数及2种评价指标构成的待评价方案矩阵A,对各时段每种参数所有站次评价指标偏差及标准差平均后进入矩阵A。

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:a_{ij}表示第i个方案关于第j项评价因素的指标值,$i=1,\cdots,n$,参数顺序参照表3,$j=1,\cdots,m$,m=1为显著性,m=2为适度性。

4.4 无量纲化及归一化

由于各大气环境参数的单位和量纲不同,为了方便比较,采用极值法对其进行无量纲化及归一化处理,如果参数值相对于气候值尽可能的偏差大(显著性明显),而标准差却又尽可能的小(适度性好),则说明该参数的效果好,得出矩阵R。

表1 2013—2018年甘肃河东各时段部分参数平均值

Tab. 1 Average values of some parameters at different time periods in Hedong of Gansu Province from 2013 to 2018

时段	R_{700}/%	θse_{700}/℃	K/℃	PW/(kg·m^{-2})	BIC/℃	LI/℃	SWEAT	TT/℃	DCI/℃	$FQB_{500-850}$/(m·s^{-1})
北抬期	65.34	61.37	27.78	29.11	−29.35	4.54	156.85	42.04	25.44	8.65
滞留期	68.77	67.85	30.72	35.66	−31.54	5.03	187.90	41.41	29.62	7.32
南撤期	72.25	68.86	30.95	36.52	−31.72	5.56	187.78	40.63	28.56	7.02

注:R_{700}表示700 hPa相对湿度;θse_{700}表示700 hPa假相当位温;K表示K指数;PW表示大气可降水量;BIC表示最大深对流指数;LI表示抬升指数;SWEAT表示危险天气指数;TT表示总指数;DCI表示深对流指数;$FQB_{500-850}$表示500 hPa与850 hPa垂直风切变。下同。

表2 2013—2018年甘肃河东短时暴雨发生临近时刻部分参数平均值

Tab. 2 Average values of some parameters at the near time of short-term heavy rain in Hedong of Gansu Province from 2013 to 2018

时段	R_{700}/%	θse_{700}/℃	K/℃	PW/(kg·m^{-2})	BIC/℃	LI/℃	SWEAT	TT/℃	DCI/℃	$FQB_{500-850}$/(m·s^{-1})
北抬期	85.30	72.81	36.83	41.83	−34.27	3.87	218.61	43.86	32.55	8.61
滞留期	93.28	78.46	38.11	52.65	−39.33	4.80	240.56	41.90	34.00	9.43
南撤期	91.72	78.13	38.82	50.87	−37.05	4.45	237.62	42.99	35.05	6.25

注:红框里的数据表示短时暴雨发生临近时刻明显大于气候平均值的大气环境参数;标蓝的数据表示短时暴雨发生临近时刻大气环境参数小于气候平均值。

表3 大气环境参数

Tab. 3 Atmospheric environment parameters

序号(n)	文字代码	物理量名称	序号(n)	文字代码	物理量名称
1	A	A指数/℃	15	R_{700}	700 hPa相对湿度/%
2	BIC	最大深对流指数/℃	16	Td_{850}	850 hPa露点温度/℃
3	LCL	抬升凝结高度/km	17	Td_{700}	700 hPa露点温度/℃
4	K	K指数/℃	18	ω_{850}	850 hPa垂直速度/(m·s^{-1})
5	LI	抬升指数/℃	19	ω_{700}	700 hPa垂直速度/(m·s^{-1})
6	SI	沙氏指数/℃	20	ω_{500}	500 hPa垂直速度/(m·s^{-1})
7	PW	大气可降水量/(kg·m^{-2})	21	$FQB_{500\text{-}850}$	500 hPa与850 hPa垂直风切变/[m·(s·km)$^{-1}$]
8	TT	总指数/℃	22	$SQTL_{700}$	700 hPa水汽通量/[g·(s·hPa·cm)$^{-1}$]
9	$T_{700\text{-}500}$	700 hPa与500 hPa温度差/℃	23	θse_{700}	700 hPa假相当位温/℃
10	SWEAT	危险天气指数	24	$\theta se_{700\text{-}500}$	700 hPa与500 hPa假相当位温差/℃
11	DCI	深对流指数/℃	25	VOR_{700}	700 hPa相对涡度/s^{-1}
12	ZH	0 ℃层高度/km	26	DIV_{700}	700 hPa散度/s^{-1}
13	q_{700}	700 hPa比湿/(g·kg^{-1})	27	DIV_{300}	300 hPa散度/s^{-1}
14	R_{850}	850 hPa相对湿度/%	28	IC	对流稳定度指数/℃

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \tag{4}$$

显著性指标归一化:

$$r_{ij}=\frac{\left|a_{ij}-\max(a_{ij})\right|}{\max(a_{ij})-\min(a_{ij})}=\frac{\left|a_{i1}-\max(a_{i1})\right|}{\max(a_{i1})-\min(a_{i1})} \tag{5}$$

适度性指标归一化:

$$r_{ij}=\frac{\left|a_{ij}-\min(a_{ij})\right|}{\max(a_{ij})-\min(a_{ij})}=\frac{\left|a_{i2}-\min(a_{i2})\right|}{\max(a_{i2})-\min(a_{i2})} \tag{6}$$

式中:a_{i1}表示第i个参数的显著性;a_{i2}表示第i个参数的适度性。

4.5 评价指标权重

采用标准差系数法确定各评价指标的权重V_j。假如某个指标可以将大气环境参数明显区分,则该指标在此评价上信息量丰富,该指标的权重大;反之权重较小。公式为:

$$V_j=\frac{\sigma_j}{\bar{r}_j} \tag{7}$$

$$\sigma_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(r_{ij}-\bar{r}_{ij}\right)^2} \tag{8}$$

$$\bar{r}_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}r_{ij} \tag{9}$$

式中:V_j为第j项指标的标准差系数;σ_j为第j项指标的标准差;$\bar{r}_j$为第j项指标的平均值;$j=1,\cdots,m$,m=2。通过该公式可以得出大气环境参数评价指标的权重(表4)。

表4 评价指标权重

Tab. 4 Weight of evaluation index

时段	显著性权重(σ_1)	适度性权重(σ_2)
北抬期	0.45	0.52
滞留期	0.41	0.58
南撤期	0.39	0.60

分析表4显示,汛期适度性的权重均大于显著性权重,说明适度性评价指标的信息丰富。

4.6 确定大气环境参数权重

通过技术方案评价公式如下:

$$F_i=\sum_{j=1}^{m}v_j r_{ij} \tag{10}$$

对不同时段的参数权重值排序,筛选出区域内各时段排在前h位F_i,作为计算参数权重的基础。

通过权重公式$W_i^C=\frac{1}{F_i}\Big/\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{F_i}$计算$F_i$对$h$位的参数权重进行排序,式中:$W_i^C$为通过$F_i$确定各参数的权重。

4.7 短时暴雨概率预报方程建立

将建立的不同时段短时暴雨大气环境参数权重应用于概率预报方程中,同时将得出的阈值进行匹配,建立不同时段概率预报方程。即:

$$P_m=\sum_{i=1}^{15}F_{mi}^C\times W_i^C \tag{11}$$

式中：P_m 为某格点某时短时暴雨发生概率；F_{mi}^{C} 为根据EC细网格资料计算的28种参数值与对应区域内对应时段的各参数历史概率特征值比较后获得大气环境参数概率；W_i^C 为对应上述h种参数的权重；m表示时段；i为参数个数。

分析大气环境参数权重(表5)显示，甘肃河东汛期不同时段短时暴雨发生时大气环境参数权重排序不同，北抬期700 hPa与500 hPa假相当位温差及700 hPa水汽通量权重排序较前；滞留期热力参数总指数、动力参数700 hPa相对涡度、水汽参数850 hPa露点温度权重排序较前；南撤期动力参数850 hPa垂直速度、水汽参数大气可降水量、热力参数K指数权重排序较前。比较发现，北抬期和滞留期700 hPa与500 hPa假相当位温差权重排序均较前，北抬期和南撤期500 hPa与850 hPa垂直风切变权重排序均较前，其余参数各时段权重排序差异大。综上所述，不同气候时段预报短时暴雨时所考虑的大气环境参数不同。

表5 大气环境参数权重

Tab. 5 Weight of atmospheric environment parameters

排列序号	参数	北抬期权重/%	滞留期权重/%	南撤期权重/%
1	Td_{850}	2.11	7.20	2.05
2	ω_{850}	2.38	1.91	8.57
3	SI	2.05	2.96	1.67
4	R_{850}	4.37	4.37	3.61
5	$FQB_{500\text{-}850}$	4.18	2.14	4.78
6	ZH	5.21	2.07	1.92
7	ω_{500}	3.74	1.80	5.44
8	K	3.58	2.84	8.79
9	LI	2.40	2.72	1.94
10	PW	2.46	1.88	7.10
11	TT	2.38	9.30	2.56
12	IC	4.48	7.00	2.09
13	DIV_{300}	1.76	1.85	4.97
14	R_{700}	5.16	3.01	2.51
15	VOR_{700}	3.06	7.27	2.23
16	$\theta se_{700\text{-}500}$	8.41	5.93	1.82
17	ω_{700}	2.73	3.41	6.29
18	$SQTL_{700}$	7.17	2.71	1.81
19	DIV_{700}	2.85	1.97	1.97
20	Td_{700}	4.38	3.26	3.12
21	SWEAT	4.77	3.25	3.67
22	θse_{700}	2.83	2.42	3.68
23	$T_{700\text{-}500}$	2.42	5.93	3.50
24	BIC	2.88	2.10	2.31
25	DCI	2.99	3.18	3.04
26	A	2.79	3.10	2.70
27	LCL	3.10	2.99	2.95
28	q_{700}	3.38	2.20	2.73

5 概率预报产品的形成及应用检验

实时运行08:00及20:00下发的EC细网格基本预报产品及计算产品，进入短时暴雨概率预报方程，形成0.25°×0.25°格点逐小时概率预报产品(图3a)。选择2020年8月4日强降水过程进行应用检验，概率在65%以上考虑有短时暴雨出现，8月4日23:00时概率预报中短时暴雨主要出现在定西中部、庆阳东北部；与实况对比显示，其对庆阳的短时暴雨

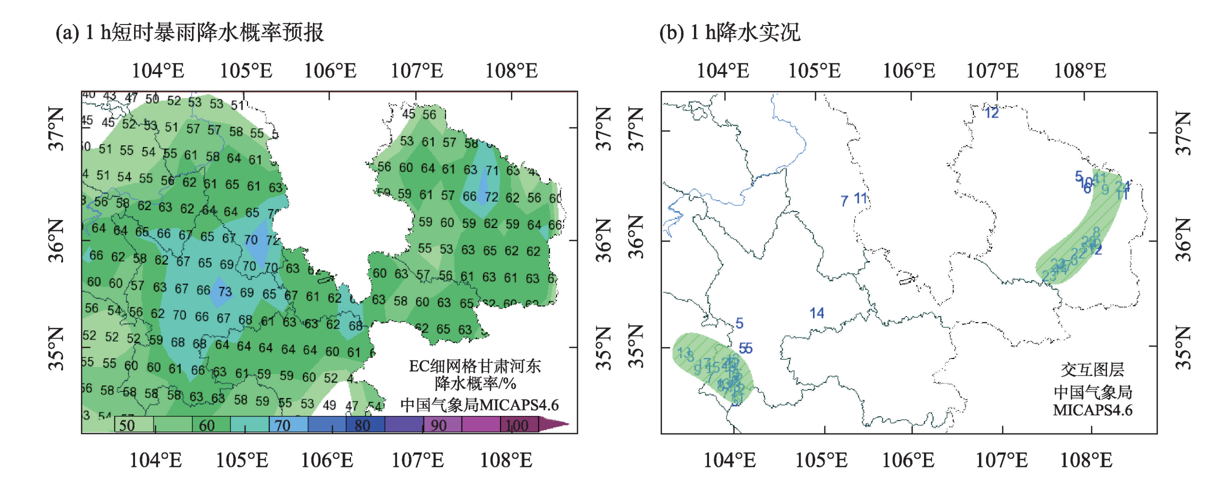


图3 2020年8月4日23:00 1 h短时暴雨降水概率预报(a)及降水实况(b)

Fig. 3 Probability forecast of short-time rainstorm precipitation (a) actual precipitation (b) at 23:00 on 4 August 2020

落区预报基本准确,对定西的预报较实况略偏北,其对甘肃河东短时暴雨预报有一定的参考价值。

6 结 论

利用甘肃河东2013—2018年6—8月逐小时降水量资料,采用百分位法确定了甘肃河东各月短时暴雨标准,并挑选出92个短时暴雨个例,分析其特征得出如下结论:

(1) 甘肃河东短时暴雨发生频次分布不均,整体看东部、南部偏多,北部偏少,其旬分布频次呈"单峰"型,7月下旬至8月上旬为频发期。

(2) 根据ECMWF再分析资料及短时暴雨个例,计算了部分大气环境参数的气候平均值及短时暴雨发生临近时刻各大气环境参数值分析表明,不同时段参数气候均值及短时暴雨临近时刻值均存在较大差异。

(3) 采用相对偏差模糊距阵法,综合评价多种大气环境参数权重,建立短时暴雨概率预报方程分析显示,甘肃河东汛期发生短时暴雨时,各时段大气环境参数权重不同,预报时需考虑其所处时段大气环境参数的权重。

(4) 基于模糊数学理论,利用显著性和适度性指标评价方案,构建了多种大气环境参数的综合评价方案,并建立了概率预报方程。

参考文献(References):

[1] 段旭, 许美玲, 孙绩华, 等. 一次滇西南秋季暴雨的中尺度系统及其模拟分析[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 597-601. [Duan Xu, Xu Meiling, Sun Jihua, et al. The meso-scale diagnostic study on a heavy rain in southwest Yunnan Autumn[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(6): 597-601.]

[2] 匡晓燕, 汤志亚, 职旭, 等. 河南短时暴雨落区预报系统[J]. 河南气象, 2003(4): 9-10. [Kuang Xiaoyan, Tang Zhiya, Zhi Xu, et al. Forecasting system of short-time rainstorm in Henan[J]. Henan Meteorological, 2003(4): 9-10.]

[3] 孙莹, 王艳兰, 唐熠, 等. 短时暴雨天气雷达回波概念模型的建立[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 235-244. [Sun Ying, Wang Yanlan, Tang Yi, et al. Construction of the radar concept model of short-time rainstrom[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(1): 235-244.]

[4] 姬凯, 王士新, 左洪超, 等. 东亚副热带急流经向位置对中国西北东部盛夏降水的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 10-17. [Ji Kai, Wang Shixin, Zuo Hongchao, et al. Effect of meridional position of East Asian subtropical jet on midsummer precipitation in eastern part of Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 10-17.]

[5] 程瑛, 侯政君, 孔祥伟, 等. 甘肃省强降水变化特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(3): 382-387. [Cheng Ying, Hou Zhenjun, Kong Xiangwei, et al. Variation characteristic of heavy rainfall in Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(3): 382-387.]

[6] 张丹梅. 2009—2016年阜新地区短时暴雨特征分析[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(24): 4762-4765, 4795. [Zhang Danmei. Characteristics of short-time rainstorm in Fuxin Region from 2009 to 2016[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(24): 4762- 4765, 4795.]

[7] 毕旭, 王丽, 张雅斌, 等. 陕西秦岭北麓致灾短时暴雨特征及预警技术[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 122- 127. [Bi Xu, Wang Li, Zhang Yabin, et al. Characteristics and Early warning technology of short-time rainstorm along the Northern side of Qinling mountains in Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 122-127.]

[8] 邓秋华, 张敬业. 区域灾害性暴雨临近预报的云团概念模型[J]. 南京气象学院学报, 1990(4): 561-567. [Deng Qiuhua, Zhang Jingye. Cloud cluster concept models for now casting regional disastrous heavy rain[J]. Journal of Nanjing Instituet of Meteorology, 1990(4): 561-567.]

[9] 郭林, 陈礼斌, 施碧霞, 等. 闽南地区短时区域暴雨的天气及多普勒雷达资料概念模型[J]. 气象, 2003, 29(5): 41-45. [Guo Lin, Chen Libin, Shi Bixia, et al. Regional heavy rain conception models with synoptic and doppler radar data in Southern Fujian Province[J]. Meteorological Monthly, 2003, 29(5): 41-45.]

[10] 陈秋萍, 余建华, 黄美金, 等. 闽中北短时暴雨概念模型[J]. 气象科技, 2005(2): 115-119. [Chen Qiuping, Yu Jianhua, Huang Meijin, et al. Conceptive models of short-range heavy rainfall in northern and Central Fujian Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2005(2): 115-119.]

[11] 张经珍, 郝家学, 金伟福. 黄河三角洲暴雨雷达回波特征及临近预报[J]. 海洋湖沼通报, 2001(1): 8-12. [Zhang Jingzhen, Hao Jiaxue, Jin Weifu, et al. Characteristics of rainstorm's radar echo and near forectast over the Yellow River Delta[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2001(1): 8-12.]

[12] 徐双柱, 邹立维, 刘火胜, 等. 湖北梅雨期暴雨的中尺度系统及其模拟分析[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 567-575. [Xu Shuangzhu, Zou Liwei, Liu Huosheng, et al. Limescale system and Numerical simulation analysis of heavy rain in Hubei Province during Meiyu[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(3): 567-575.]

[13] 张君霞, 孔祥伟, 刘新伟, 等. 青藏高原东北侧暴雨数值模式预报空间误差特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 64-74. [Zhang Junxia, Kong Xiangwei, Liu Xinwei, et al. Spatial error characteristics of rainstorm forecasts of large- scale numerical model over the northeastern side of Tibetan Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 64-74.]

[14] Peng X D, Che Y Z, Chang J. A novel approach to improve numeri-

cal weather prediction skills by using anomaly integration and historical data[J]. JCR Atmospheres, 2013, 118(16): 8814–8826.

[15] 李莉, 朱跃建. T213降水预报订正系统的建立与研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17(S1): 130–134. [Li Li, Zhu Yuejian. The establishment and research of T213 precipitation calibration system[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(S1): 130–134.]

[16] 李俊, 杜钧, 陈超君. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析[J]. 气象, 2014, 40(5): 580–588. [Li Jun, Du Jun, Chen Chaojun. Introduction and analysis to frequency or Area matching method applied to precipitation forecast bias correction[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(5): 580–588.]

[17] 邱学兴, 王东勇, 陈宝峰. T639模式预报系统误差统计和订正方法研究[J]. 气象, 2012, 38(5): 526–532. [Qiu Xuexing, Wang Dongyong, Chen Baofeng. The statistics and correction of T639 model forecast system errors[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(5): 526–532.]

[18] 孙靖, 程光光, 张小玲. 一种改进的数值预报降水偏差订正方法及应用[J]. 应用气象学报, 2015, 26(2): 173–184. [Sun Jing, Cheng Guangguang, Zhang Xiaoling. An improved bias removed method for precipitation prediction and its application[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(2): 173–184.]

[19] 智协飞, 季晓东, 张璟, 等. 基于TIGGE资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J]. 大气科学学报, 2013, 36(3): 257–266. [Zhi Xiefei, Ji Xiaodong, Zhang Jing, et al. Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation using TIGGE datasets[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(3): 257–266.]

[20] 李琴, 杨帅, 崔晓鹏, 等. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 341–356. [Li Qin, Yang Shuai, Cui Xiaopeng, et al. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(2): 341–356.]

[21] 王继竹, 郭英莲, 徐双柱, 等. 湖北省卫星云图短时暴雨概率预报方法及应用[J]. 气象科技, 2014, 42(3): 460–465. [Wang Jizhu, Guo Yinglian, Xu Shuangzhu, et al. Application of satellite data in probabilistic forecasting for short-time rainstorms in Hubei Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(3): 460–465.]

[22] 阮悦, 黄铃光, 陈齐川, 等. 基于卫星雷达等多源资料的短时暴雨预警[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 20–25. [Ruan Yue, Huang Lingguang, Chen Qichuan, et al. Short-term rainstorm warning based on satellite, radar and other multi-source data[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(2): 20–25.]

[23] 李明. 基于ECMWF细网格模式的短时强降水客观概率预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2017, 33(6): 812–821. [Li Ming. Study of the objective probability forecast method for short-time heavy rain based on ECMWF fine-mesh model[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(6): 812–821.]

[24] Kuk B, Kim H, Ha J, et al. A fuzzy logic method for lightning prediction using thermodynamic and kinematic parameters from radio sounding observations in South Korea[J]. Weather and Forecasting, 2012, 27(1): 205–217.

[25] Lin P F, Chang P L, Jou J B, et al. Objective prediction of warm season afternoon thunderstorms in northern Taiwan using a fuzzy logic approach[J]. Weather and Forecasting, 2012, 27(5): 1178–1197.

[26] 马清云, 李佳英, 王秀荣, 等. 基于模糊综合评价法的登陆台风灾害影响评估模型[J]. 气象, 2008(5): 20–25. [Ma Qingyun, Li Jiaying, Wang Xiurong, et al. A fuzzy synthetic evaluation model for typhoon disaster[J]. Meteorological Monthly, 2008(5): 20–25.]

[27] 陈新建, 段钊, 赵法锁, 等. 基于模糊数学的地质灾害危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 90–94. [Chen Xinjian, Duan Zhao, Zhao Fasuo, et al. Geological hazard risk assessment based on fuzzy mathematics[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 90–94.]

[28] 孔祥伟, 李晨蕊, 陈晓燕, 等. 甘肃河东地区基于Himawari–8卫星多通道数据的降水反演[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(3): 54–60. [Kong Xiangwei, Li Chenrui, Chen Xiaoyan, et al. Precipitation retrieval based on multi-channel data of Himawari–8 satellite in Hedong area of Gansu Province[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(3): 54–60.]

[29] 黄浩, 张勃, 马尚谦, 等. 甘肃河东地区近30年季节极端气温指数变化与环流影响[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 133–144. [Huang Hao, Zhang Bo, Ma Shangqian, et al. Seasonal variation characteristics of extreme temperature index and its influence on circulation in Hedong area of Gansu Province in the past 30 years[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(1): 133–144.]

[30] 孔祥伟, 杨建才, 李红, 等. 甘肃河东地区不同环流形势下短时强降水的雷达回波特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1057–1070. [Kong Xiangwei, Yang Jiancai, Li Hong, et al. Analysis of radar echo characteristics of short-term heavy precipitation weather with different circulation pattern in East Gansu Province[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1057–1070.]

[31] 肖光梁, 陈传雷, 龙晓慧, 等. 辽宁省短时暴雨和大暴雨时空分布与变化特征[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(5): 46–52. [Xiao Guangliang, Chen Chuanlei, Long Xiaohui, et al. Spatiotemporal characteristics of the short-term rainstorm and heavy rain-storm events in Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(5): 46–52.]

[32] 蒙军, 徐良军, 彭波, 等. 2012—2015年安顺市短时暴雨时空分布[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(3): 46–50. [Meng Jun, Xu Liangjun, Peng Bo, et al. Analysis of temporal and spatial distribution of short-time rainstorm during 2012–2016 in Anshun[J]. Mid-low Latitude Mountain Meteorology, 2019, 43(3): 46–50.]

[33] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 1–10. [Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(S1): 1–10.]

Comprehensive evaluation of atmospheric environmental parameters of short-duration rainstorm in Hedong region of Gansu Province based on fuzzy mathematics

ZHAO Yujuan, LU Yaqi, ZHANG Hongfen, ZHANG Kexin,
ZHOU Zhongwen, Liu Ying
(Qingyang Meteorological Bureau of Gansu Province, Qingyang 745000, Gansu, China)

Abstract: It is necessary to comprehensively evaluate the influence of various atmospheric environmental parameters on short-duration rainstorm forecasts in the Hedong region of Gansu Province in order to improve the short-duration rainstorm forecast equation and accuracy. Based on precipitation data from the flood season of 2013 to 2018 in the Hedong region of Gansu Province, using the percentile method, the threshold of short-duration rainstorms from June to August in Hedong was calculated. Ninety-two cases of short-duration rainstorms in the Hedong region of Gansu Province were selected based on the threshold of time-to-storm rain. Using ECMWF 0.25°×0.25° reanalysis data to analyze the atmospheric environmental parameters, it was found that the K index, relative humidity of 700 hPa, the atmospheric precipitable amount, and other parameters are good indicators of short-duration rainstorms in the Hedong region of Gansu Province. Based on the method of fuzzy mathematics, considering the significance and moderation, a comprehensive evaluation plan for 28 atmospheric environmental parameters was constructed, and the weights of atmospheric environmental parameters in different periods were obtained. The analysis shows that, when short-duration rainstorms occur in the flood season in the Hedong region of Gansu Province, the weights of atmospheric environmental parameters differ in different periods. When forecasting a short-duration rainstorm, the weight of atmospheric environmental parameters in the period in which it is located should be considered, and the parameters with the highest weight ranking should mainly be considered.

Keywords: Hedong region of Gansu Province; short-duration rainstorm; fuzzy mathematics; atmospheric environmental parameters; ECMWF fine-mesh model